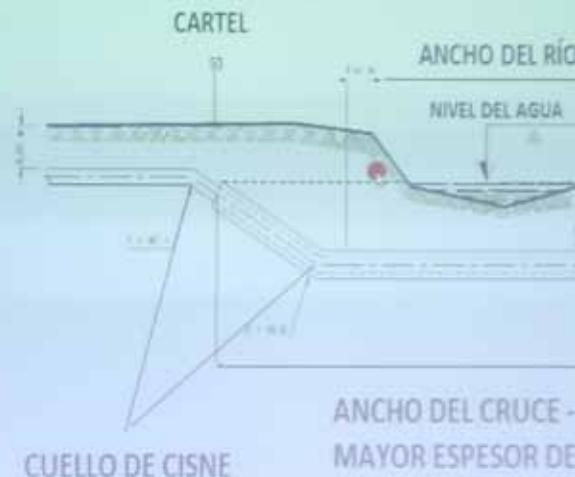


ESQUEMA TÍPICO DE U



5° Congreso de Integridad y Corrosión en la Industria del Petróleo y del Gas

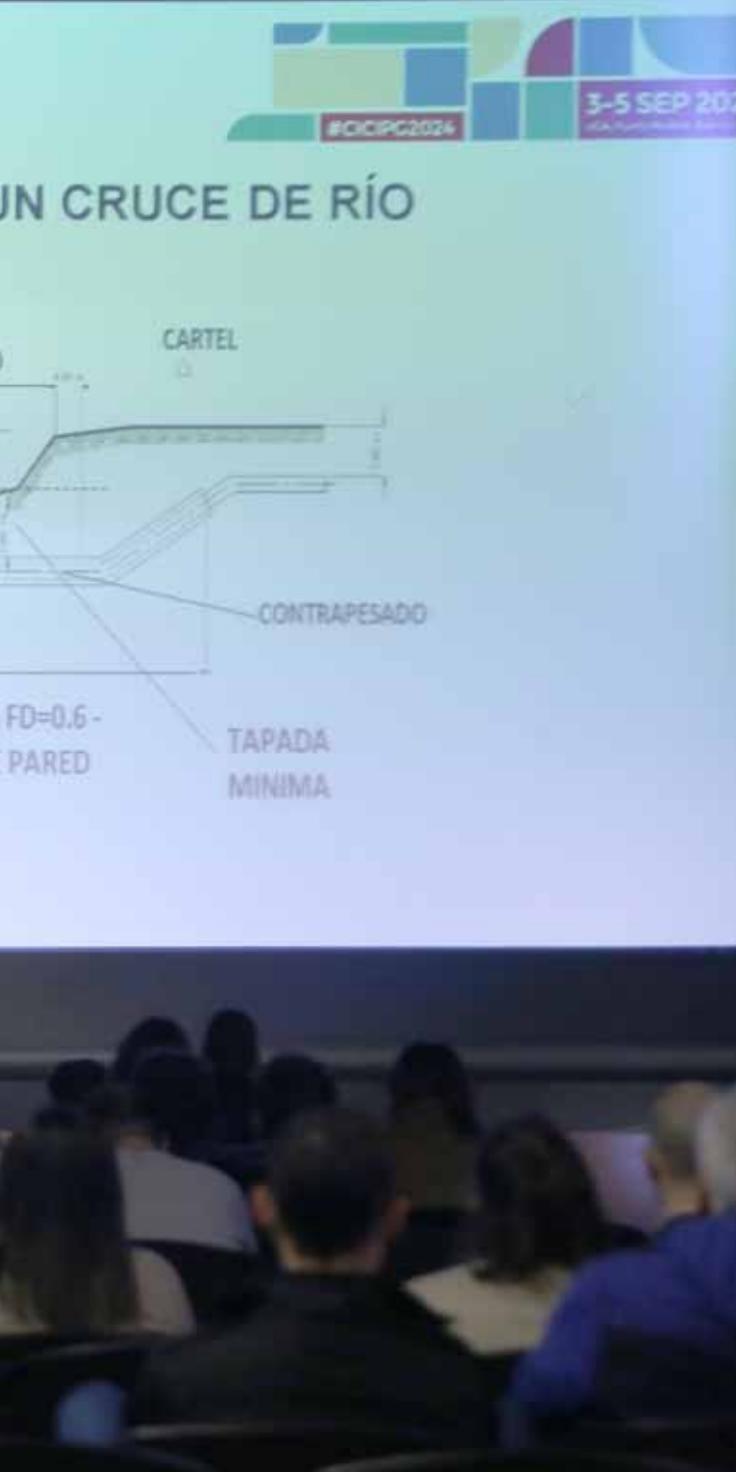
IAIPG
INSTITUTO ARGENTINO
DEL PETRÓLEO Y DEL GAS

Cruce de ríos: Análisis de riesgo hídrico cuantitativo

Este trabajo fue seleccionado en el 5° Congreso de Integridad y Corrosión en la Industria del Oil and Gas del año 2024

Por **Martín Carnicero**, **Marianela Gómez**
y **Leonardo Martinetto** (TGN)

Este paper presenta un método cuantitativo para evaluar amenazas hidrotécnicas en la interacción entre ríos y ductos en operación. Incluye la identificación de amenazas, la vulnerabilidad de la cañería y el impacto en vidas humanas. Basado en relevamientos de campo, modelos matemáticos y segmentación de cañerías, permite resultados transparentes y comparables con otras amenazas a la integridad de los ductos.



Durante los últimos años se ha llevado a cabo una actividad intensa enfocada en el desarrollo de métodos de análisis de riesgo aplicados a la operación de ductos. Esto ha conducido en la existencia de muchas alternativas con distintos alcances (cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos). Se plantea a menudo cuál elegir, en función de los datos disponibles. En este trabajo se plantea un método cuantitativo, entre cuyas características principales se incluye la totalidad de las amenazas hidrotécnicas posibles en la interacción de un río con un ducto en operación, la vulnerabilidad de la cañería ante estas amenazas y, el análisis de las consecuencias basado en el impacto sobre en vidas humanas. Mediante relevamientos de campo, cálculos ingenieriles (modelos matemáticos de escurrimiento hidráulico y análisis de tensiones) y la metodología de segmentación

de la cañería en base a sus propiedades, se podrán fundamentar los resultados en forma transparente y repetible. Finalmente, el riesgo calculado podrá ser comparado con otras amenazas a la integridad de un ducto en operación.

Introducción

Las trazas de los gasoductos cruzan numerosos ambientes naturales, cada uno de los cuales tiene un relieve y un régimen de precipitaciones particulares. Estas dos características hacen que cada cruce tenga que ser considerado de manera particular. Por ello, en la industria se considera como un cruce especial. Ello implica que se construyan con especificaciones técnicas distintas de lo normal, tales como mayores tapadas y espesores de pared de tuberías, y contrapesado. Luego la contraparte que completa la integridad de un cruce de río está dada por el comportamiento del curso de agua en el tiempo. Finalmente, la integridad del gasoducto en un cruce viene dada por:

- Características constructivas del cruces (fijas en el tiempo)
- Evolución del curso de agua (variable a lo largo del tiempo)

La interacción entre estos dos factores es lo que se analiza para garantizar la integridad del ducto. En los párrafos siguientes este análisis se desarrolla en sus distintas partes, con el fin último de cuantificar el riesgo ante las amenazas hidrotécnicas.



Figura 1. Interacción entre el río y el ducto como origen de las amenazas hidrotécnicas.

Características particulares del diseño de un cruce de río

Los cruces de ríos tienen una serie de características en su diseño que se listan a continuación:

- Menor factor de diseño, normalmente igual a 0.6, de acuerdo a lo estipulado por la Norma NAG100 [1],
- Mayor espesor de pared del ducto,
- Mayor tapada,
- Contrapesado
- Cuellos de cisne alejados de las márgenes

A continuación, se adjunta un esquema típico de cruce de ríos. Se debe tener en cuentas que las particularidades constructivas en los cruces existentes pueden variar con las descritas.

Tipos de amenazas hidrotécnicas

A continuación, se listan, con una breve descripción, los comportamientos más comunes de los ríos, ilustrados con figuras y fotos tomadas de la realidad:

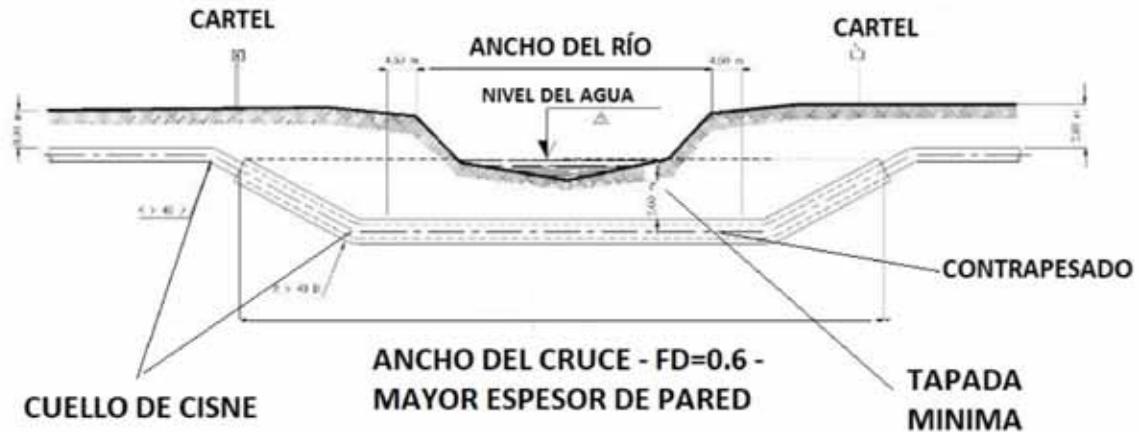


Figura 2. Esquema típico de un cruce de río

Erosión vertical (de fondo o socavación): la misma consiste en el descenso del lecho y la consecuente disminución de tapada vertical. Esta erosión puede ser generalizada en donde todo el lecho baja su elevación (ver Figura 3); o localizada alrededor de una obstrucción en el curso.

Erosión lateral (erosión de margen): este fenómeno puede darse de 3 maneras distintas (ver Figuras 4 a 6) a saber:

- **Curva que permanece en el tiempo en la misma ubicación:** se da en aquellos cursos de agua que tienen curvatura, ocurriendo la erosión en su cara externa o cóncava por efecto de la fuerza centrífuga que genera corrientes secundarias del escurrimiento,
- **Curva de ríos con meandros:** este caso como los meandros evolucionan en el tiempo, trasladándose hacia aguas abajo o aguas arriba (apilamiento), pueden erosionar un año una margen y otro año la margen opuesta, alternativamente,
- **Erosión de margen (acercamiento o invasión) ante un río que corre paralelo al ducto:** en este caso de erosión se traduce en grandes tramos de gasoductos expuesto, sometidos a la corriente de agua, con la particularidad que no fueron diseñados como cruces especiales (sin mayor espesor, sin mayor tapada y sin contrapesar). No involucra un cruce.

Cambios de curso o avulsión: se trata del caso en que un río cambia su curso original tomando otra dirección (ver Figura 7). Los casos más usuales son:

- **Cortas de meandro:** cuando los meandros tienen una gran curvatura (curvas muy cerradas) el río las corta, dejando de escurrir por la curva y siguiendo en línea recta,
- **Fuga del río por la pista de mantenimiento:** este caso se da cuando el río se colmata y el agua encuentra en la pista una vía preferencial de escurrimiento.
- En ambos casos, las longitudes de cañería pueden quedar expuestas y sometidas a la corriente de agua, sin que la cañería esté contemplada en su construc-

ción como cruce especial (sin mayor espesor, sin mayor tapada y sin contrapesar). Por ello, su resistencia a las tensiones inducidas es menor.

Acarreo de fondo y flujo de detritos: esta es una condición del río que involucra el transporte de objetos



Figura 3. Descenso generalizado del lecho por erosión aguas debajo de una alcantarilla



Figura 4. Erosión de margen con destape de cuello de cisne



Figura 5. Erosión de margen por meandro con destape de cuello de cisne



Figura 6. Erosión por acercamiento o invasión de pista en un ducto paralelo al río



Figura 7. Fuga del río por la pista con el ducto sometido a la corriente de agua y a la flotación

dentro de la corriente que eventualmente pueden impactar en una cañería expuesta (ver Figuras 8 y 9). Los detritos se materializan como grandes rocas, marañas de troncos y ramas, o cualquier otro objeto capaz de ser transportado en una corriente de agua. Influyen las altas velocidades del agua y el aumento de la densidad del flujo (barro) que hace que floten grandes rocas.



Figura 8. Daños en el contrapesado de hormigón por impacto de rocas por acarreo de fondo



Figura 9. Impacto de rocas transportada por el flujo de barro en un bypass expuesto

Esfuerzos transmitidos por una corriente de agua sobre un ducto expuesto

Los principales esfuerzos transmitidos por una corriente de agua (o agua y detritos) sobre un ducto expuesto se enumeran a continuación:

- **Flotación:** este fenómeno se contrarresta mediante la colocación de contrapesos en sus diversos tipos. Normalmente, se establece un porcentaje de flotabilidad negativa sobre las fuerzas de empuje (ver Figura 7),
- **Fuerza de arrastre:** es la que provoca la corriente que ejerce una presión sobre la cañería. Puede aumentar ante la presencia de ramas que aumenta la superficie de acción (ver Figura 10).
- **Fatiga debida a la vibración inducida por vórtice:** al escurrir el agua alrededor de una cañería inmersa en la corriente, se liberan vórtices del lado de arriba y abajo del ducto alternativamente, lo que



Figura 10. Flexión por arrastre en una cañería expuesta

hace que la tubería suba y baje. Esto genera un esfuerzo de fatiga en donde la vibración puede acercarse a la frecuencia natural del ducto, produciendo eventualmente su rotura.

- **Impactos de detritos:** como ya se ilustró, los detritos arrastrados por la corriente impactan sobre una cañería expuesta provocando flexiones, abolladuras o su rotura (ver Figura 11).

Estudio de integridad de un cruce de río

Ante un problema significativo que pueda afectar la integridad de un ducto en un cruce de río se procede a realizar un estudio de integridad que incluye como mínimo la siguiente partes componentes:

- Compilación de relevamientos y antecedentes constructivos del cruce
- Topografía del río geo-referenciada
- Medición de tapada geo-referenciada
- Estudios hidrológicos (modelos) para obtener el caudal de diseño
- Estudios hidráulicos (modelos) para obtener la velocidad, profundidad y cota alcanzada por el agua, y usarlos para el cálculo de socavación en vertical
- Estudios multitemporales de imágenes satelitales y fotos aéreas geo-referenciadas para estimar los

corrimientos laterales y cambios de alineación del curso de agua dentro del contexto de los distintos años hidrológicos.

Esta información es de vital importancia y será usada para evaluar la probabilidad de falla dentro del análisis de riesgo.

¿Riesgo de qué?

Previo a entrar en el detalle de la metodología de análisis de riesgo, es válido contestar esta pregunta para aclarar qué es lo que se está discutiendo y evitar confusiones. En la actividad de transporte de hidrocarburos, el riesgo analizado es aquel que implica una pérdida de contención del fluido transportado, es decir, fugas y roturas.

Análisis de riesgo cuantitativo para geoamenazas

A lo largo de los últimos años, se han desarrollado diferentes tipos de análisis de riesgo en ductos. Al momento de elegir el método más apropiado es importante considerar que el método incluya los siguientes elementos de análisis:

- Todas las amenazas hidrotécnicas, ya descritas en los párrafos anteriores,
- Vulnerabilidad de la cañería: este tema está relacio-



Figura 11. Impacto de piedras sobre una cañería fuera de servicio

nado con las tensiones inducidas por el agua en un cruce y la capacidad del ducto de resistirlas,

- Capacidad de comparar el resultado con el resultado del análisis de riesgo proveniente de otras amenazas a la integridad de un ducto de transporte,

De los muchos métodos disponibles, se eligió del desarrollado por Moness Rizkalla y Ron Read, a través de numerosas publicaciones [2]. El mismo calcula la susceptibilidad o probabilidad de falla anual (Pof), asignando probabilidades a cada uno de los factores principales intervinientes y multiplicándolos (ver Ecuación 1). A continuación, se enumera cada uno de ellos con su correspondiente pregunta básica asociada, con una breve descripción de cuál es el criterio a seguir para su selección.

$$S_{GI} = I_i \cdot F_i \cdot V_i \cdot M_i$$

Ecuación 1. Fórmula de susceptibilidad o probabilidad de falla anual

- **I_i : Factor de iniciación** (¿Cuánta certeza?): en este caso se plantea la ocurrencia de una amenaza. Por definición de cruce de río, se tiene la certeza de que las amenazas hidrotécnicas (crecidas, erosiones) se desarrollan en ese tramo de ducto, por lo cual se puede asumir como válido el valor 1.

- **F_i : Recurrencia** (¿Qué tan frecuente?): la recurrencia es un factor que tiene una gran importancia. Normalmente se define como el período medio de tiempo en que un determinado caudal sea igualado o superado. Este concepto está íntimamente asociado al caudal de diseño que se usa para definir las amenazas a la integridad del ducto, es decir, la velocidad del agua, los procesos de erosión y los esfuerzos eventualmente transmitidos a la cañería. Existen muchas maneras de definir la recurrencia: puede ser dado por la normativa vigente (nacional o internacional), por criterios propios de cada operadora, por el riesgo asociado a la pérdida de contención del fluido transportado o por la vida útil de la instalación. Normalmente, se asumen recurrencias de 50 a 100 años, tomando valores de 0.02 o 0.01.
- **V_i : Vulnerabilidad**: se plantean 3 preguntas básicas:
 - **Alcance espacial** (¿Qué tan extenso?): se analiza la zona de influencia del gasoducto y sus cercanías. Generalmente, se considera todo el ancho del cruce (valor 1), salvo que sea muy ancho (valle de inundación),
 - **Duración** (¿Qué tan rápido?): para los que trabajan en riesgos naturales o geoamenazas, mediante el monitoreo sistemático, se pueden

prever y seguir las amenazas a lo largo del tiempo, por más que exista un evento extremo que dispare su ocurrencia. Dependiendo del sistema de monitoreo, los valores pueden asumirse entre 0.1 y 1, o en función de una velocidad de erosión.

- **Resistencia** (¿Qué tan frágil?): se puede dar el caso en que la amenaza se desarrolle en la zona de influencia del ducto, pero que, al mismo tiempo, no afecta el estado tensional del mismo. De allí que el concepto de vulnerabilidad esté asociado al análisis de tensiones. No consi-

FACTOR	PREGUNTA	PROBABILIDAD ASIGNADA	DESCRIPCION
INICIACION	CUANTA CERTEZA?	0	No es posible. Faltan las condiciones esenciales para a ocurrencia
		0.001	No es creible, no hay evidencias pasadas de ocurrencia, hay casi certeza de que las condiciones que permiten la ocurrencia no existen
		0.01	Incierto, condiciones que permiten la ocurrencia podrian existir pero no hay evidencia suficiente para confirmar o refutar
		0.1	Creible, no hay evidencias de ocurrencia, las condiciones que permiten la ocurrencia presumiblemente existen en base a lugares proximos o inestabilidad observada
		1	Hay certeza, existen condiciones que permiten la ocurrencia, hay evidencias de ocurrencias en el pasado o inestabilidad observada
RECURRENCIA	QUE TAN FRECUENTE?	0.0001	Una ocurrencia cada 10.000 años
		0.001	Una ocurrencia cada 1.000 años
		0.01	Una ocurrencia cada 100 años
		0.1	Una ocurrencia cada 10 años
		1	Una ocurrencia cada 1 año
		1/T	En donde T es el tiempo en el estado critico si las condiciones del lugar estan cambiando (maximo = 1)
VULNERABILIDAD	ALCANCE ESPACIAL	0	El ducto no intercepta la zona de influencia de la geoamenaza (ZIG) o sus cercanias
	QUE TAN EXTENSO?	0.01	El ducto intercepta la zona cercana a la ZIG pero en la zona de acumulacion
		0.1	El ducto intercepta la zona cercana a la ZIG en la zona de acumulacion o en la zona de remocion
		1	El ducto intercepta la ZIG en la zona de remocion
	DURACION	0.1	Se prevee que la geoamenaza se desarrolle gradualmente, hay suficiente tiempo para intervenir antes del impacto
	QUE TAN RAPIDO?	1	Se prevee que la geoamenaza se desarrolle rapidamente, no hay suficiente tiempo para intervenir antes del impacto
		v/d	En donde d es la distancia de viaje hasta el gasoducto y v es la velocidad de movimiento (maximo =1)
	QUE TAN FRAGIL?	0	Sin impacto en la cañeria
		0.001	Impacto en la cañeria no tiene consecuencias (chances de 0.1% de que se concrete el contexto de riesgo), se actua dentro del mantenimiento programado
		0.01	Impacto en la cañeria es minimo (chances de 1% de que se concrete el contexto de riesgo), se actua dentro del mantenimiento programado
0.1		Impacto en la cañeria implica una situacion de no cumplimiento (chances de 10% de que se concrete el contexto de riesgo), se actua dentro del mantenimiento no programado	
1		Impacto en la cañeria implica una situacion de rotura o fuga (chances de 100% de que se concrete el contexto de riesgo), se actua dentro de una respuesta a la emergencia	
MITIGACION	QUE TAN EFECTIVA?	0	Cambio de traza o cruce aereo para evitar la ZIG
		0.001	Aislamiento de la cañeria por debajo de la ZIG mediante la profundizacion de la cañeria o perforacion dirigida
		0.01	Medidas de mitigacion mediante movimientos de suelos y monitoreo
		0.1	Medidas de mitigacion y monitoreo intensivo
		0.5	Monitoreo de rutina y mantenimiento de operacion de la cañeria

Tabla 1. Tabla de probabilidades para la probabilidad de falla (según Rizkalla & Read)

derarlo implica, normalmente, sobredimensionar el riesgo asociado a una cañería expuesta. Los valores asumidos en un tramo de cañería expuesta en un cruce varían 0 y 1, según su longitud en relación a la longitud máxima admisible de cañería sin apoyo sujeta a la corriente.

- **M_i:Mitigación** (¿Qué tan efectiva?): varía desde soluciones extremas como un cambio de traza o un cruce dirigido, el estado de las obras de protección existentes, o solo variar la frecuencia de monitoreo en caso de potencial riesgo bajo. Es muy importante resaltar la importancia de un programa eficiente de monitoreo porque es la **primera herramienta de mitigación de riesgo**, que permite prever los problemas con anticipación, disminuyendo los alcances de las obras de remediación. Es interesante plantear el caso de que, eventualmente, la mitigación puede disminuir el riesgo a cero, a pesar de que todos los otros factores de la tabla sigan presentes.

Una de las ventajas de este método en que es repetible y transparente. En ocasiones, se plantea la duda de cómo elegir las probabilidades de la tabla, más allá de las explicaciones y recomendaciones dadas en los párrafos anteriores. La manera de elegir las probabilidades es a través de buscar en las prácticas ingenieriles la información de respaldo a cada elección. Esto se obtiene mediante el estudio de integridad, ya que provee relevamientos de campo geo- referenciados, estudios de suelos, cálculo de erosión vertical y lateral, estudios de evolución morfológica del río a lo largo del tiempo, y análisis de tensiones desarrollados para calcular la máxima longitud ad-

misible de cañería sin apoyo sujeta a la corriente de agua. A continuación, se presenta la Tabla 1, con los rangos de valores de cada factor tendientes a calcular la Pof.

Caso de estudio: cruces del Río Lavayén

El Río Lavayén, es un río importante que fluye de sur a norte drenando buena parte de las provincias de Salta y Jujuy, cambiando de nombre hasta desembocar en el Río Bermejo, bajo el nombre de San Francisco. Cruza al Gasoducto Norte en 4 líneas de ductos listados con sus fechas aproximadas de construcción:

- Gasoducto de Expansión de 30", año 2010
- Gasoducto Loop de 24", año 1997
- Gasoducto Troncal de 24"; año 1960
- Gasoducto Paralelo de 16", año 1974

En 64 años, las condiciones de la cuenca hidrográfica del río cambiaron significativamente, principalmente por la extensión de la frontera agrícola y los cambios en las sucesivas temporadas de lluvias con períodos más húmedos o secos a lo largo de los años. El comportamiento del río, a grandes rasgos, se puede analizar en base a dos parámetros geomorfológicos básicos (ver Figura 12): el área de la cuenca y la pendiente del río en los cruces [3]. Estos valores se obtienen de estudios hidrológicos (5189 km²) y de la topografía del río en los cruces (0.16%).

Este gráfico nos muestra que el río posee una cuenca de aportes importante que junto con las abundantes precipitaciones estivales le dan posibilidad de generar altos caudales durante crecidas. La pendiente del río en el cru-

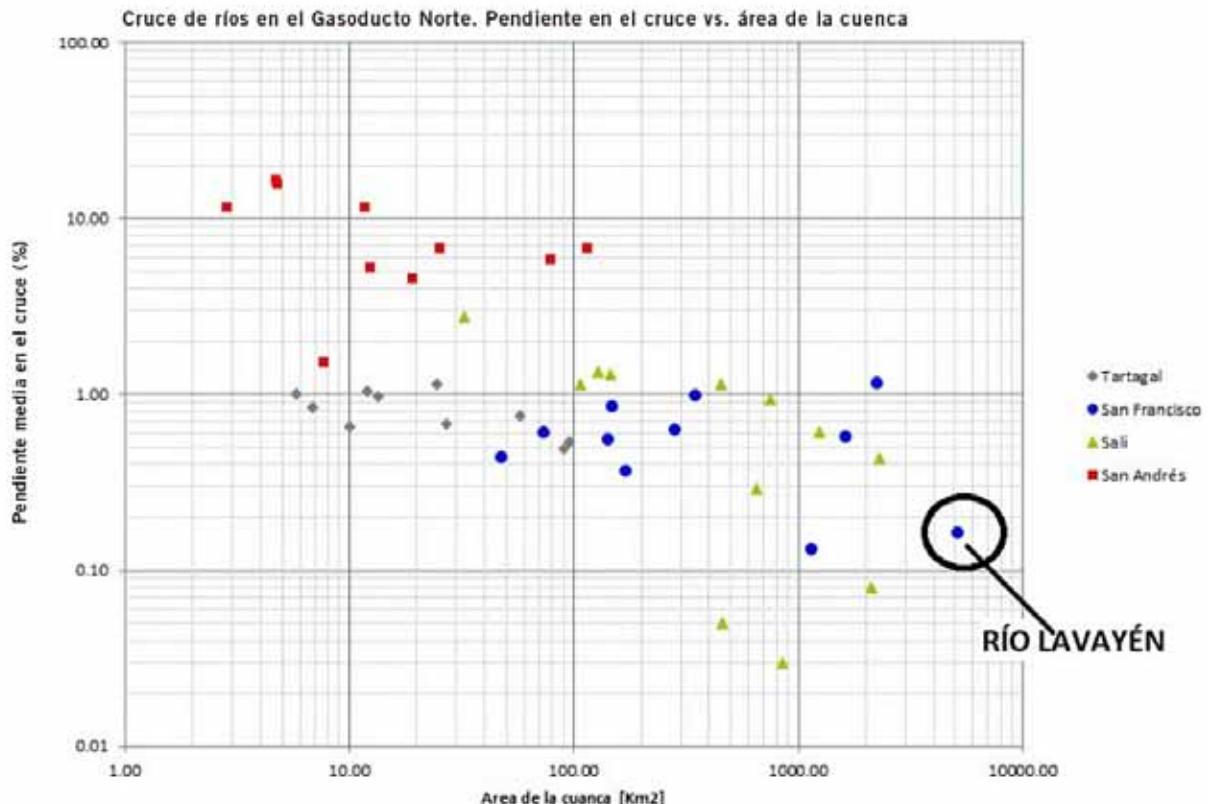


Figura 12. Relación área-pendiente para el Río Lavayén



Figura 13. Imagen satelital del río en la zona de los cruces a marzo de 2023

ce es moderada ya que viaja de sur a norte, favoreciendo una alineación en planta curvilínea (ver Figura 13), con énfasis en las erosiones de márgenes.

Amenazas naturales: ¿dependientes o independientes del tiempo?

Es común en trabajos y normas nacionales e internacionales tratar las amenazas naturales como una amenaza

za independiente del tiempo. Este caso, y muchos otros, indican lo contrario. Se puede hacer un seguimiento en el tiempo y decidir en qué momento es necesario intervenir en función del riesgo asociado. Si bien una crecida correspondiente a un evento extremo, puede disparar un cambio en la situación de los cruces, mediante el monitoreo periódico se pueden prevenir y planificar los trabajos en el tiempo. Es importante recalcar la importancia del relevamiento (y su frecuencia) como primera herramienta de reducción del riesgo

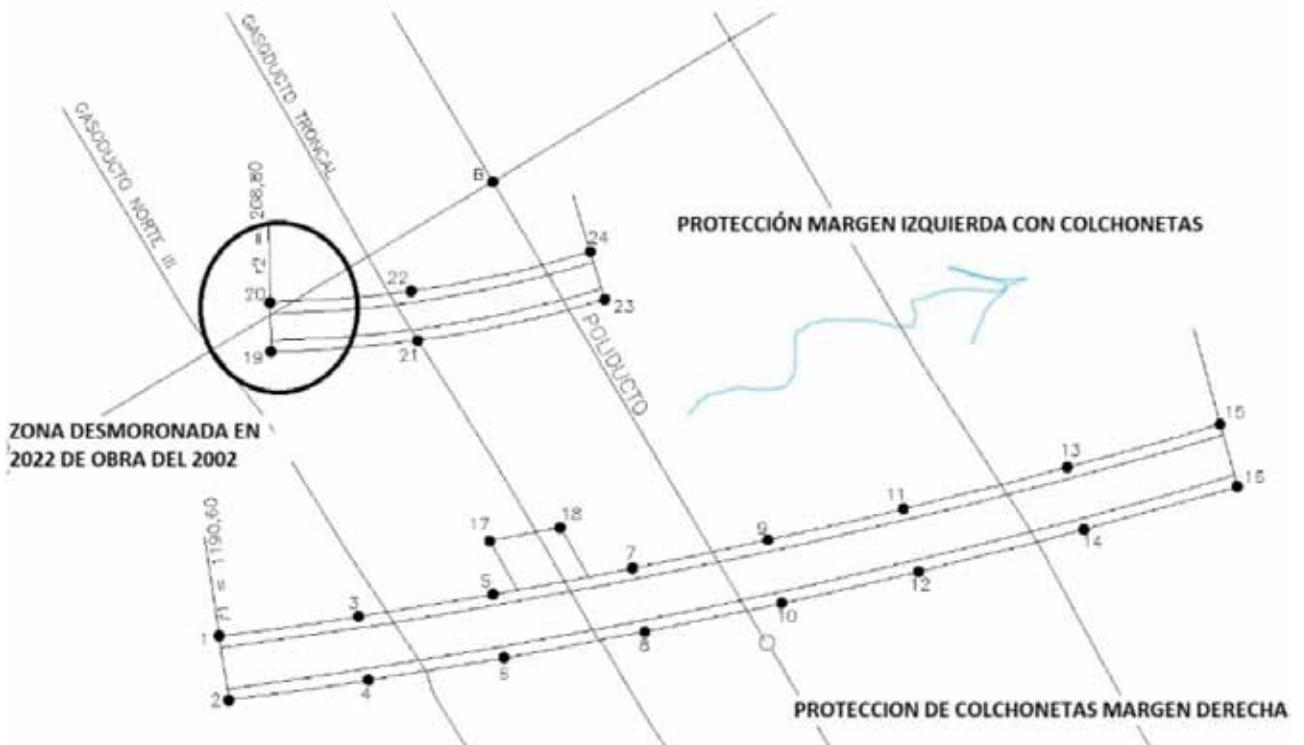


Figura 14. Obras de protección implementadas en 2002

Historia de remediación del cruce y estado de situación a mediados de 2022

En el año 2002 (ver figura 14), en este cruce se implementó una obra de adecuación en las márgenes. El comportamiento de la obra fue exitoso hasta el año 2022, en donde se notó que parte de la protección de margen izquierda o norte se había comenzado a desmoronar en un extremo (ver Figura 15). A partir de allí se encargó un estudio de integridad completo para generar la información necesaria para el análisis de riesgo y se decidió reparar y extender la obra en dicha margen [4].

Calculo de la probabilidad de falla para cada línea de gasoductos en el cruce

En los párrafos siguientes, se enumerará la información usada para la adopción de las probabilidades de la Tabla 1, con una descripción breve de los fundamentos de cada elección. Por razones de espacio, se presentará la información gráfica del gasoducto Troncal que es el más comprometido. Luego, para las otras líneas se repite el proceso decisorio sin los gráficos correspondientes.

- **Iniciación:** 1 Se tiene certeza que la amenaza se desarrolla en el cruce, durante todas las temporadas de lluvia.
- **Recurrencia:** 0.02. En la industria se toma entre 50 (TGN) y 100 años de recurrencia.
- **Vulnerabilidad:**

- **Alcance espacial:** 1. En este caso el cruce entero intercepta la zona de remoción de la amenaza (lecho y márgenes)
- **Duración:** 1. Ante una obra parcialmente desmoronada una crecida puede disparar rápidamente una situación que afecte la integridad del ducto, ya que el proceso de seguimiento en el tiempo ya se agotó. Se relaciona con un tramo de baja tapada vertical y horizontal dado por el relevamiento de tapada georeferenciado realizado durante el estudio de integridad (ver Figura 16).
- **Qué tan frágil:** este apartado se analiza realizando un cálculo de tensiones inducidas por el agua dado por la norma API 1133 [5], para determinar las tensiones máximas admisibles ante los esfuerzos de arrastre y fatiga por vibración inducida por vórtice.

En este caso, los cálculos realizados mediante el modelo matemático (HEC- GeoRas [6], de dominio público, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU) dan como resultado las velocidades, profundidades y cotas de la superficie libre del agua. El modelo toma como base de información principal las secciones transversales medidas durante la topografía y el caudal de diseño para un período de retorno o recurrencia de 50 años. Con la información generada y los estudios de suelo se calcula la socavación vertical según la fórmula de Litchvan- Lebediev para suelos no cohesivos.



Figura 15. Erosión de margen y desmoronamiento parcial de la obras de protección en 2022, en margen norte o izquierda

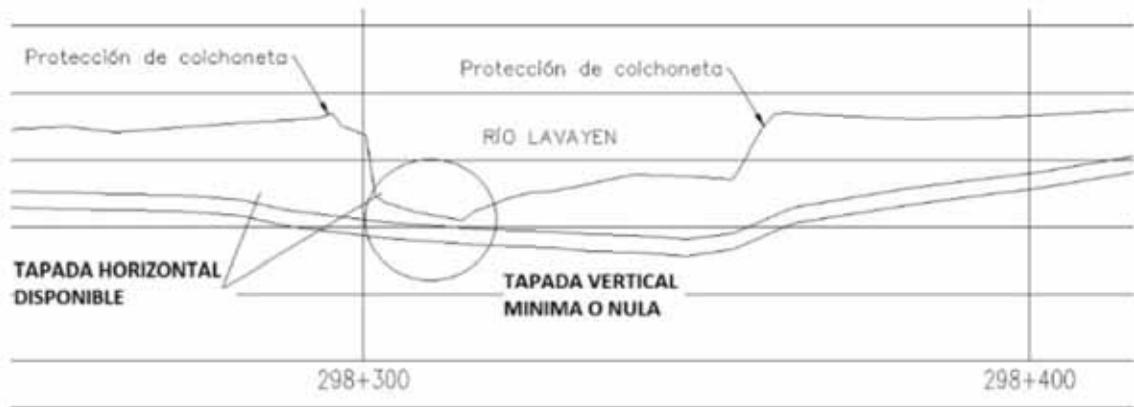


Figura 16. Relevamiento de tapadas vertical y horizontal (deducida) antes de la obra

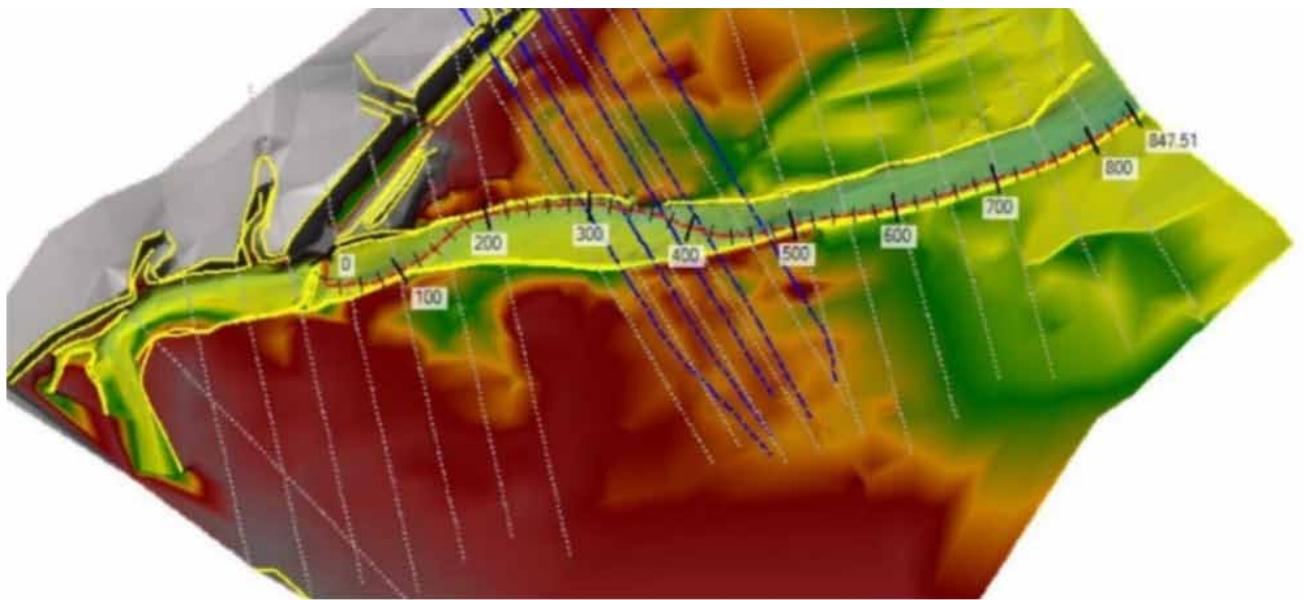


Figura 17. Modelo hidráulico HEC-RAS

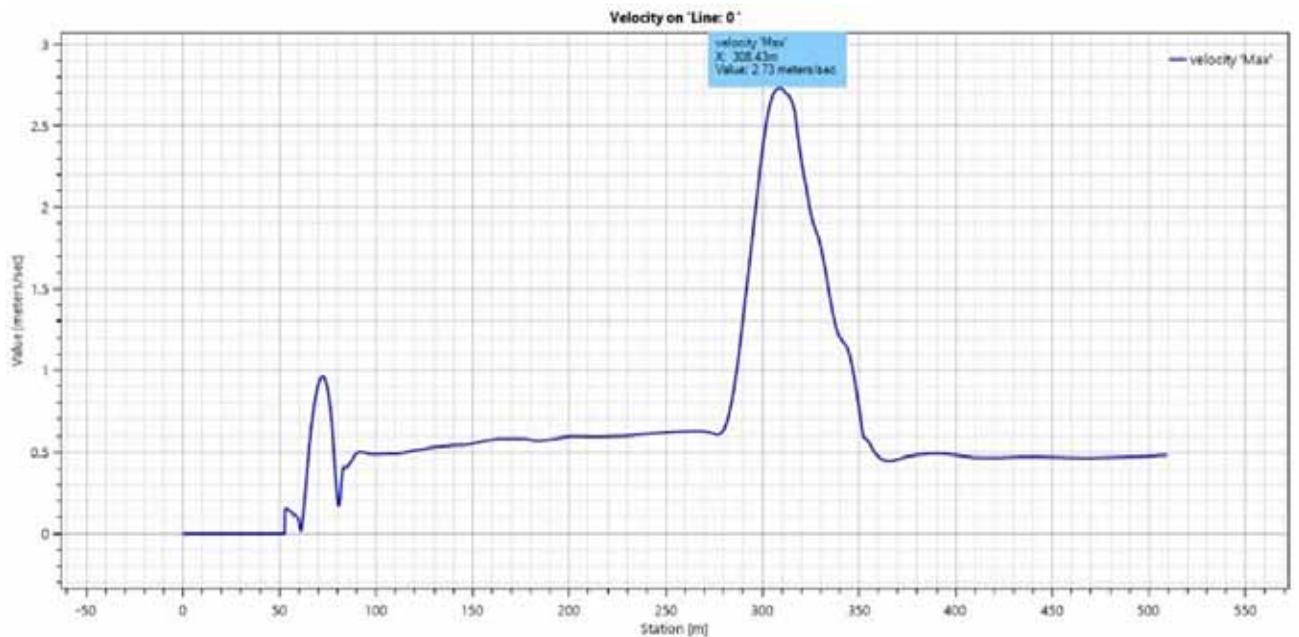


Figura 18. Velocidades del agua calculadas por el modelo HEC-RAS en la sección del Troncal

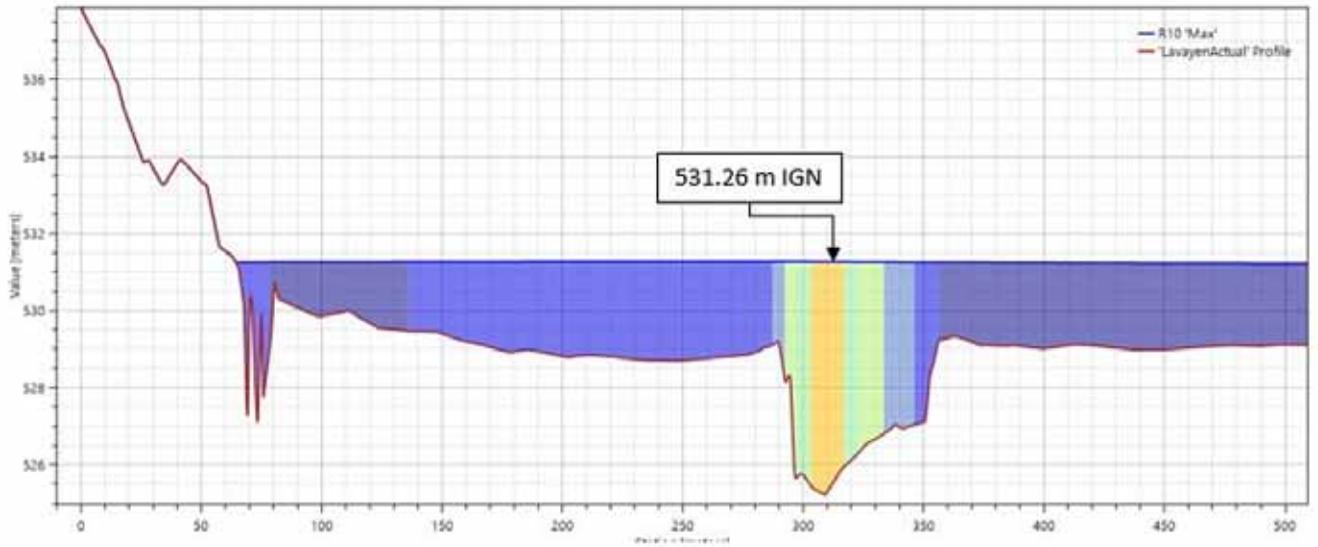


Figura 19. Distribución de velocidades en la sección del Troncal (mayores en margen izquierda)

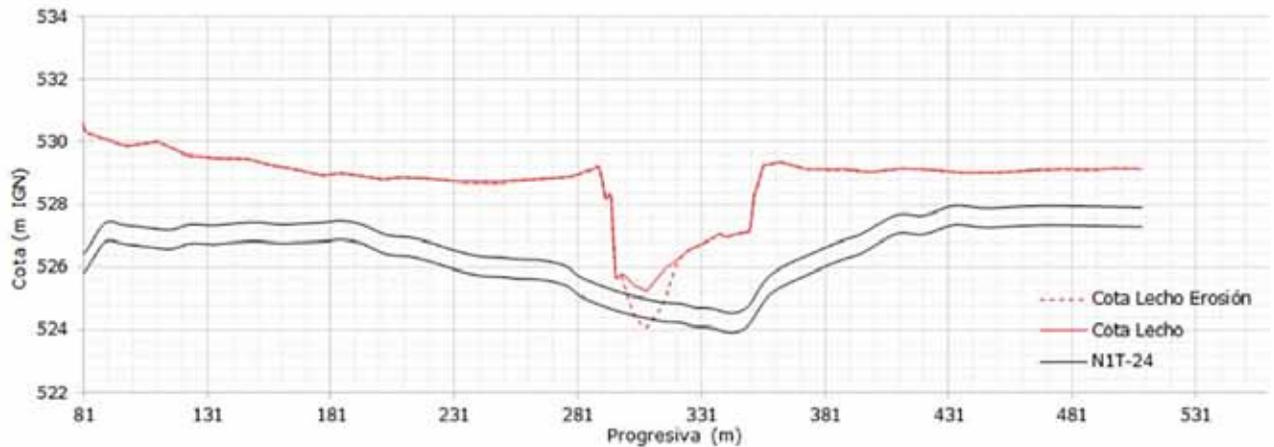


Figura 20. Cálculos de la socavación de vertical en el lecho del río en la sección del Troncal

ESFUERZO DE ARRASTRE						
No	DATOS	VARIABLE	UNIDAD	VALOR	FUENTE	
1	FACTOR DE DISEÑO	Df		0.60	NORMA	
2	TENSIÓN DE FLUENCIA	SMYS	PSI	52000.00	PLANO CAO	
3	PRESIÓN DEL GAS (MAPO)	P	KG/CM2	68.40	TABLA MAPO	
4	DIAMETRO EXTERNO	D	INCHES	24.00	PLANO CAO	
5	ESPESOR DE PARED	t	MILIMETROS	12.70	PLANO CAO	
6	VELOCIDAD DEL AGUA	V	METROS/SEG	2.73	MODELO	
7	ESPESOR DE REVESTIMIENTO ANTICORROSIVO	tcorr	INCHES	0.00	NO CONTEMPLADO	
8	ESPESOR DEL HORMIGON DE CONTRAPESADO	tcw	MILIMETROS	100.00	PLANO CAO	
9	PESO ESPECÍFICO DEL AGUA (CON SEDIMENTOS)	w	KG/M3	1100.00		
10	PESO ESPECÍFICO DEL ACERO	Wm	KG/M3	7850.00		
11	PESO ESPECÍFICO DEL GAS	SG	KG/M3	64.467		
12	PESOS ESPECÍFICO DEL REVESTIMIENTO ANTICORROSIVO	Wcorr	KG/M3	0.00	NO CONTEMPLADO	
13	PESO ESPECÍFICO DEL HORMIGON DE CONTRAPESADO	Wcw	KG/M3	2400.00		
VIBRACION INDUCIDA POR VORTICE (SE AGREGA)						
No	DATOS	VARIABLE	UNIDAD	VALOR	FUENTE	
14	MODULO DE ELASTICIDA DEL ACERO	E	KG/CM2	2,100,000.00		
15	COEFICIENTE DE STROUHAL	CD		0.20	API 1133	

Tabla 2. Datos necesarios para calcular las longitudes máximas admisibles para un caño expuesto y sin apoyo sujeto a la corriente de agua según API 1133.

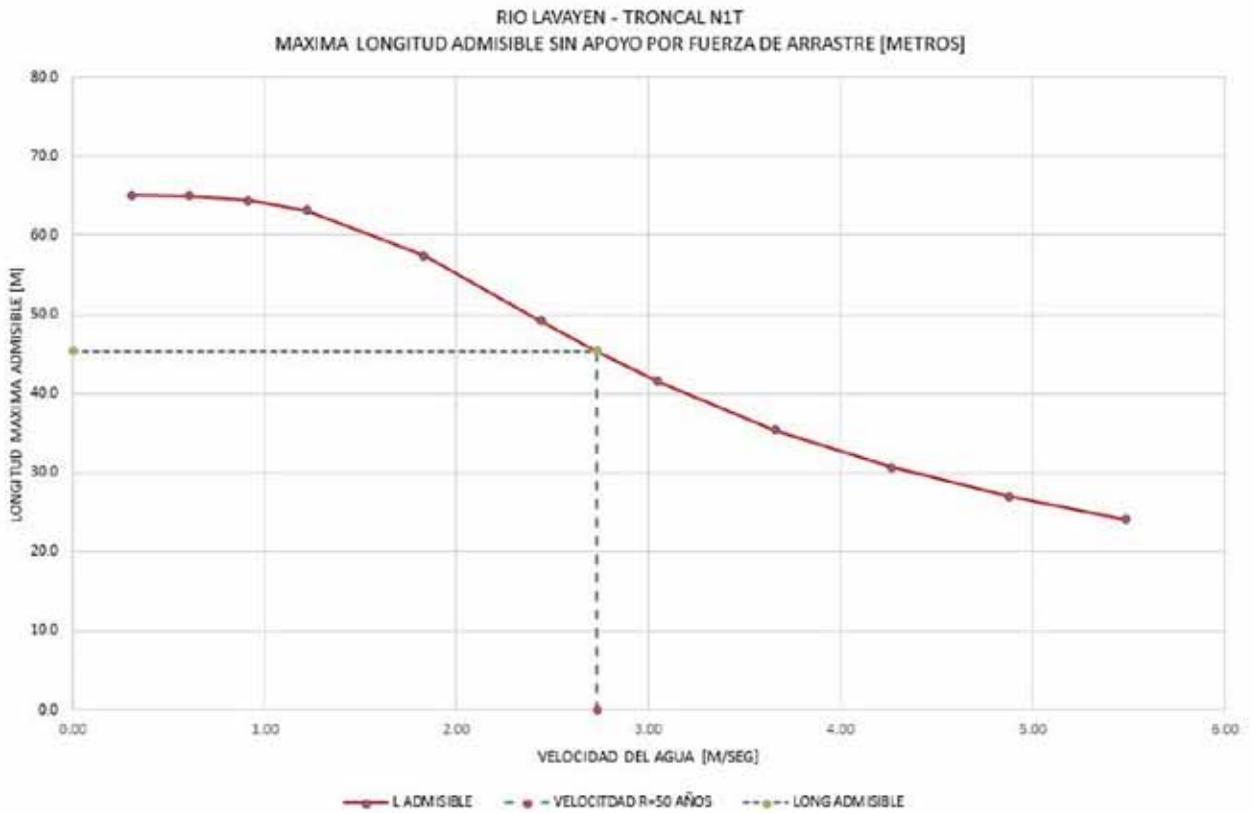


Figura 21. Longitud admisible para el Troncal considerado expuesto y sin apoyo para el esfuerzo de arrastre.

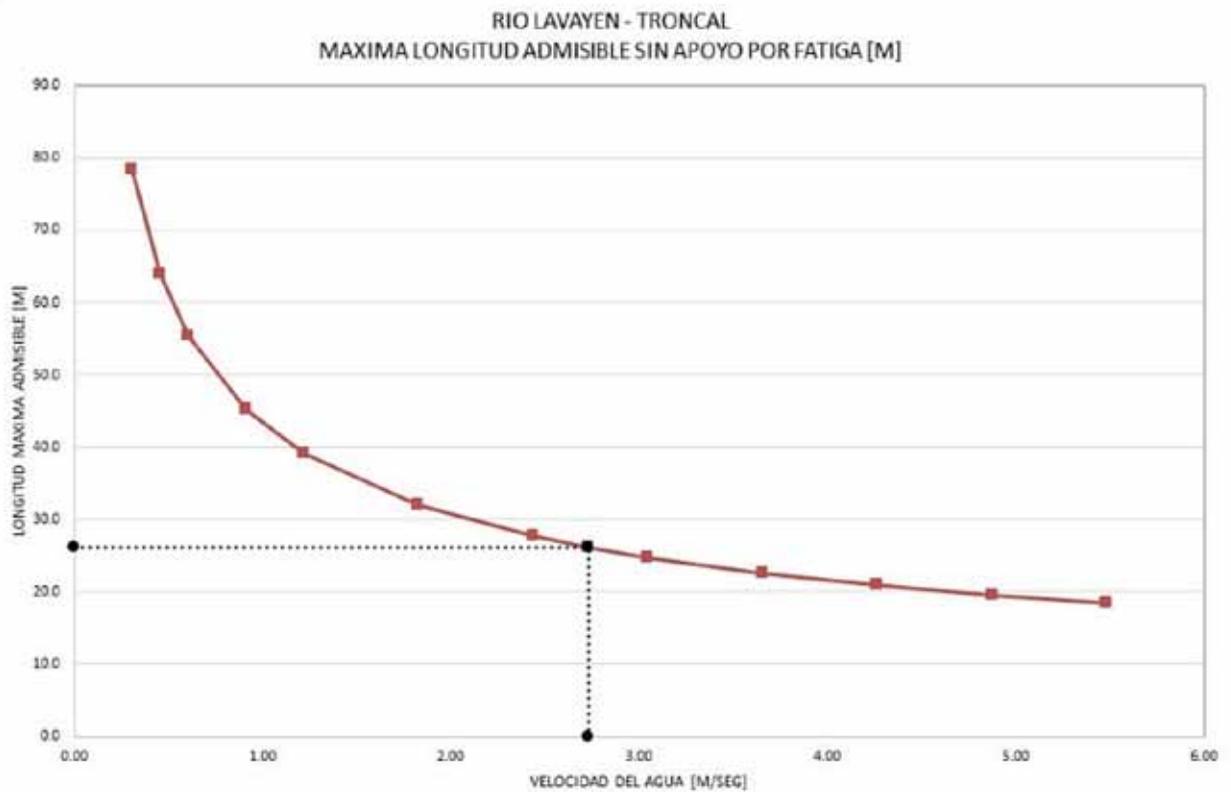


Figura 22. Longitud admisible para el Troncal considerado expuesto y sin apoyo para el esfuerzo de fatiga

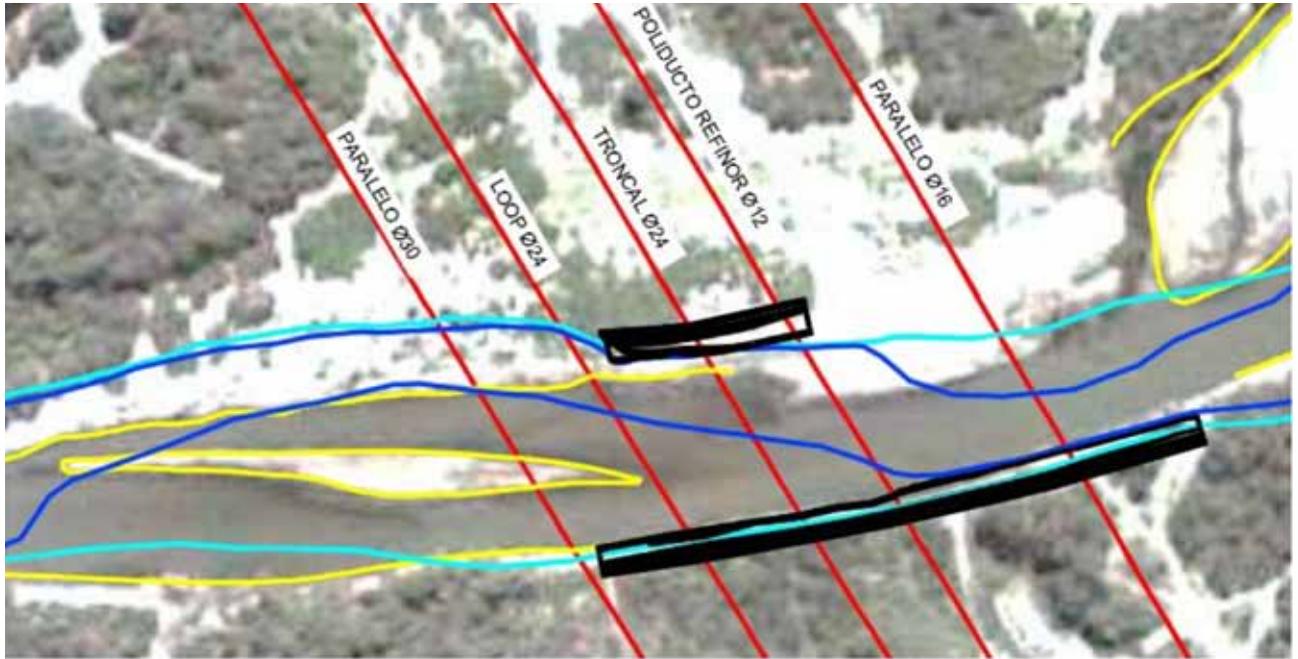


Figura 23. Superposición de márgenes entre 2000 y 2022 donde se ve el corrimiento lateral en margen izquierda o norte aguas arriba de la protección construida en el año 2002.

Con estos valores provenientes del estudio de integridad, se pueden aplicar los metodología de cálculo definidas en la norma API 1133, que las utiliza junto con de las características constructivas del cruce (obtenidas de los planos conforme a obra de cada cruce) para definir las longitudes máximas admisibles de las cañerías sin apoyo expuestas a una corriente de agua, sometida a esfuerzos de arrastre y vibración inducida por vórtice (fatiga). La Tabla 2 muestra los valores de ingreso necesarios para los cálculos. A partir de dicha información se generan los gráficos de longitudes máximas admisibles en función de la velocidad del agua, que se muestran en las Figuras 21 y 22. Estos gráficos se generaron variando la velocidad del agua en un rango razonable e indicando aquella correspondiente al valor de la corrida del modelo para 50 años de recurrencia (2.73 m/seg), en la sección transversal del río coincidente con la traza del gasoducto Troncal.

Los cálculos arrojan que para la velocidad del agua correspondiente a un caudal de 50 años de recurrencia (2.73 m/seg) las longitudes máximas admisibles son 45m para el esfuerzo de arrastre y 26m para el esfuerzo de fatiga provocado por la vibración inducida por vórtice. Es importante destacar que estos resultados deben ser tomados como valores referenciales, y no como datos fácticos. En la realidad influyen fuertemente las condiciones de apoyo en las márgenes y lecho del tramo expuesto y el tiempo (hidrograma de crecida) necesario en que la crecida actúe sobre la cañería expuesta para que la vibración llegue a la frecuencia natural del ducto.

A continuación, se analizarán estos resultados dentro del contexto del río y del estudio de integridad, especialmente la evolución de la geometría del río a lo largo del tiempo, de las tapadas disponibles y de la socavación. Del estudio multitemporal de imágenes satelitales

disponibles y de la comparación de los 2 relevamientos topográficos geo-referenciados de los años 2002 y 2022, se tiene que el río ha erosionado principalmente la margen izquierda o norte (ver Figura 23). La margen opuesta (derecha o sur) tiene aún la protección realizada en el año 2002 en buen estado.

Estas erosiones laterales se conjugan con las verticales totalizando unos 32 m de cañería expuesta, que eventualmente sucedería ante una crecida de 50 años de recurrencia. Esta longitud se compara con las tapadas disponibles y las longitudes máximas admisibles, para evaluar el riesgo. Se tiene que la tapada vertical disponible es nula y la horizontal es 10 m, menor que lo medido según la evolución del río en 22 años. Aún más preocupante es que la longitud máxima admisible por fatiga (26 m) es menor que la erosión potencial mencionada (32m). Esto indica que se está ante una situación de seria amenaza a la integridad de la cañería a pesar de que hay cierto margen de la cañería para resistir la fuerza de arrastre (32m vs 45m). Este análisis se vuelca en la selección de la probabilidad más alta de la Tabla 1, congruente con el valor 1 y la descripción de tener “impacto en la cañería que implica una situación de rotura o fuga (chances de 100% de que se concrete el contexto de riesgo), se actúa dentro de una respuesta a la emergencia”.

Cruce	Corrimiento 2000-2022 margen izquierdo
Expansión 30"	22
Loop 24"	24
Troncal	12
Paralelo 16"	10

Tabla 3. Corrimientos de margen izquierda en el período 2000-2022 en cada ducto

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	[M]
LONG EXPUESTA X CALCULO DE SOCAVACION VERTICAL	20,0
EROSION LATERAL EN 22 AÑOS MEDIDA EN MARGEN NORTE	12,5
LONGITUD DE DESTAPE POTENCIAL (SOCAVACION+ EROSIÓN LATERAL MEDIDA)	32,5
TAPADA VERTICAL DISPONIBLE SEGÚN TAPADAS 2022	0,0
TAPADA LATERAL DISPONIBLE SEGÚN TAPADAS 2022	10,0
LONGITUD ADMISIBLE X ARRASTRE	45,4
LONGITUD ADMISIBLE X FATIGA	26,2

Tabla 4. Comparación de erosiones potenciales y longitudes máximas admisibles para el gasoducto troncal

- **Mitigación:** 0,1. Para este valor se considera la situación de relevamiento antes de la implementación de la obra, es decir, como ya se venía siguiendo el problema en el tiempo, se releva con un monitoreo intensivo.

Todo lo expresado anteriormente se resume en la Tabla 5, que muestra cada una de las probabilidades adoptadas y PoF final que es igual a 2×10^{-3} . El umbral de PoF puede fijarse por un valor normativo o por una política propia de la operadora. En este caso el límite de referencia es 10-3, indicando que se deben tomar medidas de remediación.

PoF de los otros ductos que cruzan el río Lavayén

En forma análoga, siguiendo la misma metodología, se agregan las PoF de las otras líneas, que dan un resultado menos riesgoso, principalmente porque tienen mayores tapadas horizontales y verticales disponibles o están protegidas por las obras anteriores del 2002, que no se desmoronaron.

Calculo de la consecuencia y valor final de riesgo

Como se mencionó anteriormente este análisis de la consecuencia de un evento de rotura (CoF), se encuentra

FACTOR	PREGUNTA	PROBABILIDAD ASIGNADA	DESCRIPCION
INICIACION	CUANTA CERTEZA?	1	Hay certeza, existen condiciones que permiten la ocurrencia, hay evidencias de ocurrencias en el pasado o inestabilidad observada
RECURRENCIA	QUE TAN FRECUENTE?	0.02	Una ocurrencia cada 50 años
VULNERABILIDAD	ALCANCE ESPACIAL -QUÉ TAN EXTENSO	1	El ducto intercepta la ZIG en la zona de remocion
	DURACIÓN-QUE TAN RAPIDO?	1	Se prevee que la geoamenaza se desarrolle rapidamente, no hay suficiente tiempo para intervenir antes del impacto
MITIGACION	QUE TAN FRAGIL?	1	Impacto en la cañeria implica una situacion de rotura o fuga (chances de 100% de que se concrete el contexto de riesgo), se actua dentro de una respuesta a la emergencia
	QUE TAN EFECTIVA?	0.1	Medidas de mitigacion y monitoreo intensivo
N1T 24 "	PROBABILIDAD DE FALLA	2.00E-03	

Tabla 5. Probabilidad de falla (PoF) del Gasoducto Troncal

TABLA DE PROBABILIDADES DE FALLA				
LINEA	N1P	N1L	N1T	N2P
INICIACION-CUANTA CERTEZA	1	1	1	1
RECURRENCIA-QUE TAN FRECUENTE	0,02	0,02	0,02	0,02
VULNERABILIDAD				
ALCANCE ESPACIAL-QUE TAN EXTENSO	1	1	1	1
DURACIÓN-QUE TAN RAPIDO	0,1	0,1	1	0,1
QUE TAN FRAGIL	0,001	0,1	1	0,1
MITIGACIÓN-QUE TAN EFECTIVA	0,5	0,1	0,1	0,5
PROBABILIDAD DE FALLA	1,00E-06	2,00E-05	2,00E-03	1,00E-04

Tabla 6. PoF para todas las líneas que cruzan el Río Lavayén antes de la obra

principalmente basado en el impacto sobre vidas humanas. Como se puede observar en la Figura 24, este cálculo cuenta con 3 principales factores:

- **Área Afectada:** Para el caso de un gasoducto, el peor escenario que se puede presentar es que se produzca su rotura, seguido de la ignición del gas natural liberado. Para establecer cuál sería el área afectada, se utilizó un modelo de gran aceptación en la industria, llamado "Radio de Impacto Potencial" el cual está definido en la norma ASME B31.8S [7], y adoptado tanto en la norma de USA como en la Parte O de Argentina [8], para determinar los límites de las "Áreas de Alta Consecuencia" (HCA) o Áreas Sensibles (AS). Para este análisis se consideran escenarios de rotura completa del ducto y también parcial considerado como una fuga mayor, producto de la presencia de una perforación (large hole) con sus respectivas probabilidades.
- **Probabilidad de Ignición:** Se utilizan las expresiones de probabilidad de ignición definidas en la norma inglesa IGEM-TD/2 [9], las cuales se basan en una amplia base de datos de incidentes. Este análisis establece una correlación indicando una mayor probabilidad de ignición a medida que aumenta la presión operativa al momento de la rotura y/o el diámetro del ducto.
- **Receptores:** Se establece una densidad poblacional en los alrededores del ducto, tomando como



Figura 24. Esquema de cálculo final del valor de riesgo

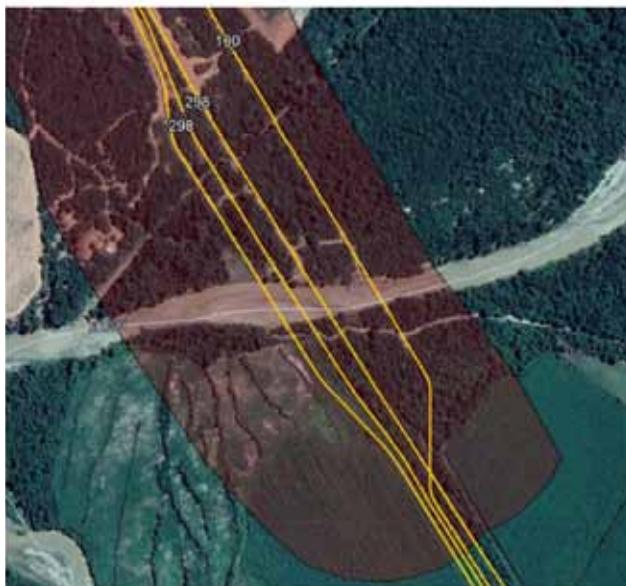


Figura 25. Límites del Área Sensible y superposición de radios de impactos para los 4 ductos.

referencia las áreas afectadas en caso de rotura, determinadas por el modelo de “radio de impacto potencial”. Se utiliza la clase de trazado del sitio y la presencia de posibles “Áreas Sensibles” que produzcan una mayor concentración de personas en algún tiempo determinado del año. A los fines del cálculo, esta variable se expresa en unidades de [USD/m²] incorporando el concepto de “valor estadístico de la vida” de una persona (VSL en inglés).

En lo que respecta al cálculo de receptores, este sitio tiene la particularidad de contar con un Área Sensible, originada por la presencia de un área ocasional de acampe y pesca sobre las márgenes del río. En función de relevamientos de campo se estimó una cantidad de personas que frecuentan el sitio, principalmente durante los fines de semana.

En la Tabla 7 se resumen los valores de consecuencia obtenidos para cada ducto.

Los valores de consecuencia obtenidos para cada sistema, se deben considerar en el siguiente contexto y premisas:

1. El cruce se encuentra ubicado en una clase de trazado 1 (CT1) con muy baja densidad poblacional con presencia permanente. Para la situación del Área Sensible, la misma es de frecuencia baja (solo 52 días en el año).
2. A la fecha, no se están considerando costos fijos de interrupción del servicio, daño a instalaciones y pérdida de volumen de gas, como tampoco otros costos indirectos como imagen de la compañía, impacto en negocios futuros, etc. Estos últimos son factores de difícil estimación, que se agrupan como parte del factor Find.

VARIABLE	N1P	N1L	N1T	N2P
1- PRESIÓN [kg/cm ²] ¹	75,5	68,4	68,4	51
2- DIÁMETRO ["]	30	24	24	16
3- RADIO DE IMPACTO POTENCIAL [m]	206,7	157,4	157,4	90,6
4- ÁREA CALCULADA [m ²] ²	64911,52	23193,48	23193,48	3274,69
5- PROBABILIDAD DE IGNICIÓN (ROTURA; PERFORACIÓN)	0,6444 ; 0,0555	0,3970 ; 0,0555	0,3970 ; 0,0555	0,1687 ; 0,0555
6- RECEPTORES [USD/m ²]	0,8883	0,9352	0,9415	1,1978
7- CONSECUENCIA [USD] (4 x 6 x Find) ³	69193,1	26028,6	26204,0	4706,9

1. Se considera la MAPO
 2. Este área calculada considera la probabilidad asociada a los dos escenarios de falla: rotura total y perforación (large hole)
 3. Se introduce un factor multiplicador para considerar otros costos indirectos. En este caso se utiliza F indirectos = 1,2.

Se considera la MAPO
 Este área calculada considera la probabilidad asociada a los dos escenarios de falla: rotura total y perforación (large hole)
 Se introduce un factor multiplicador para considerar otros costos indirectos. En este caso se utiliza F indirectos = 1,2.

Tabla 7. Resumen de cálculo de valor de consecuencia para cada ducto.

El mayor valor de la consecuencia está asociado al sistema N1P, siendo este el ducto con mayor diámetro y máxima presión operativa.

Aplicando estos valores calculados, según lo indicado en la Figura 24 se obtienen los valores de riesgo de la tabla 8.

El resultado de riesgo obtenido está en unidades de USD/año y se expresa en términos de “Pérdida Esperada”, el cual representa una tasa de pérdida promedio a futuro, como combinación de todos los escenarios de falla analizados en un determinado punto del tramo en estudio.

Como se viene mencionando anteriormente, el sistema N1T es el más comprometido respecto a PoF y finalmente resulta el de mayor nivel de riesgo con un valor de 52,41 USD/año. Los sistemas N1L y N2P resultaron con un valor de riesgo similar. Debido a su bajo valor de PoF, el ducto N1P construido en el año 2010, tiene un nivel de riesgo varios órdenes de magnitud menor, a pesar de ser el sistema con mayor valor de consecuencia.

TABLA DE PROBABILIDADES DE FALLA				
LINEA	N1P	N1L	N1T	N2P
INICIACION-CUANTA CERTEZA	1	1	1	1
RECURRENCIA-QUE TAN FRECUENTE	0,02	0,02	0,02	0,02
VULNERABILIDAD				
ALCANCE ESPACIAL-QUE TAN EXTENSO	1	1	1	1
DURACIÓN-QUE TAN RAPIDO	0,1	0,1	1	0,1
QUE TAN FRAGIL	0,001	0,1	1	0,1
MITIGACIÓN-QUE TAN EFECTIVA	0,5	0,1	0,1	0,5
PROBABILIDAD DE FALLA [fallas/año]	1,00E-06	2,00E-05	2,00E-03	1,00E-04
CONSECUENCIA [USD]	69193,08	26028,647	26203,99	4706,9118
RIESGO [USD/año]	0,07	0,52	52,41	0,47

Tabla 8. Resumen de valores de riesgo para cada ducto.

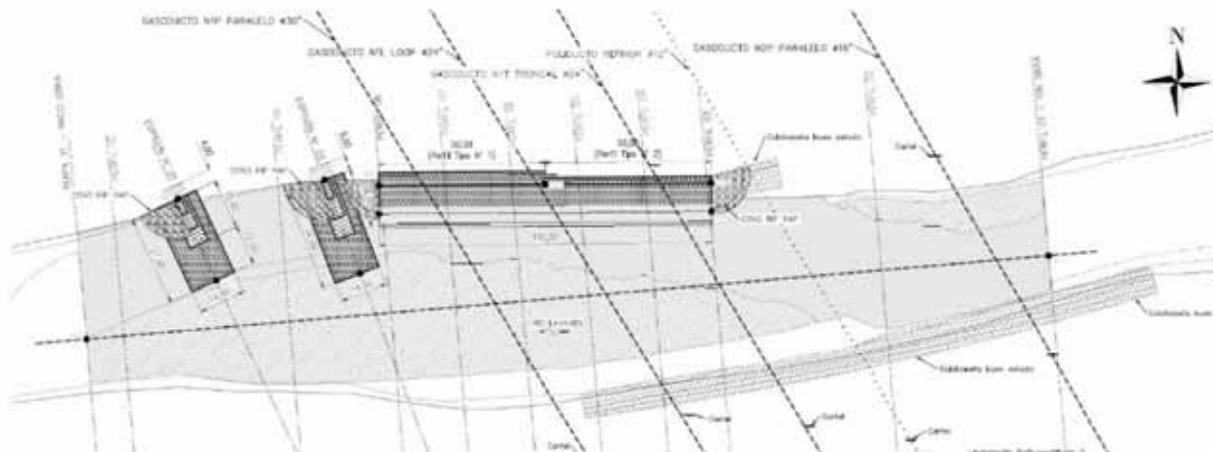


Figura 26. Obras de adecuación implementadas en el año 2023

Gerenciamiento del riesgo

Como consecuencia del monitoreo continuo, la información generada en el estudio de integridad del cruce y del análisis de riesgo realizado, se decidió implementar una obra de adecuación (ver Figura 26), consistente con la construcción de 2 espigones deflectores de la corriente y una protección de margen izquierda extendida hacia aguas arriba para proteger los ductos de Expansión 30" y Loop de 24".

TABLA DE PROBABILIDADES DE FALLA				
LINEA	N1P	N1L	N1T	N2P
INICIACION-CUANTA CERTEZA	1	1	1	1
RECURRENCIA-QUE TAN FRECUENTE	0,02	0,02	0,02	0,02
VULNERABILIDAD				
ALCANCE ESPACIAL-QUE TAN EXTENSO	1	1	1	1
DURACIÓN-QUE TAN RAPIDO	0,1	0,1	1	0,1
QUE TAN FRAGIL	0,001	0,001	0,001	0,1
MITIGACIÓN-QUE TAN EFECTIVA	0,001	0,001	0,001	0,1
PROBABILIDAD DE FALLA	2,00E-09	2,00E-09	2,00E-08	2,00E-05
CONSECUENCIA [USD]	69193,0802	26028,6473	26203,9897	4706,9118
RIESGO [USD/año]	1,38E-04	5,21E-05	5,24E-04	9,41E-02

Tabla 9. Cálculo de las PoF para todas las líneas que cruzan el Río Lavayén y su riesgo asociado después de la obra

Repitiendo una vez más el proceso de cálculo de riesgo, se tienen los resultados luego de la implementación de la obra, lo cual se traduce en una disminución de los valores de PoF más allá del rango de intervención definido anteriormente y en consecuencia una disminución de su nivel de riesgo. Igualmente, se seguirá con el monitoreo de rutina, con énfasis en el ducto N2P Paralelo de 16".

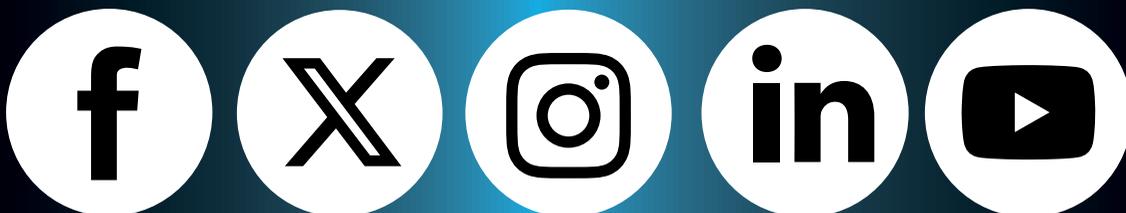
Conclusiones

El método propuesto contempla una herramienta válida para analizar el riesgo al considerar todas las amenazas naturales que ocurren en un cruce de río y la capacidad de los ductos de resistirlas. Mediante su uso, se puede tomar una decisión fundamentada sobre cuándo intervenir con una obra de adecuación y decidir su alcance. Cuantificando la probabilidad de falla y las consecuencias, se puede comparar este problema a la integridad de un ducto frente a otras amenazas típicas de la operación, tales como defectos, corrosión, daños por terceros o cambios por clase de trazado.

Referencias

- NAG 100 - Normas Argentinas Mínimas de Seguridad para el transporte y distribución de gas natural y otros gases por cañerías
- Pipeline Geohazards: Planning, Design, Construction and Operations. Rizkalla, Moness & Read Rodney S., ASME
- Aplicación de un Método de Análisis de Riesgo a 10 cruces de ríos; Carnicero Martín; Congreso de Integridad IAPG 2014
- Estudio de Integridad del Río Lavayén, BISA para TGN, 2022
- Managing Hydrotechnical Hazards for Pipelines Located Onshore or Within Coastal Zone Areas, API recommended Practice 1133, Second Edition, 2017
- HEC-GeoRAs, <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>
- ASME B31.8S - Managing System Integrity of Gas Pipelines
- NAG 100 - Parte O: Gerenciamiento de la Integridad de Líneas de Transmisión
- IGEM-TD/2 Edition 2 - Assessing the risks from high pressure Natural Gas pipelines

Seguinos en nuestras redes



**INSTITUTO ARGENTINO
DEL PETROLEO Y DEL GAS**

www.iapg.org.ar